



**FACULTY OF ELECTRICAL ENGINEERING
AND INFORMATION SCIENCE**



**INFORMATION TECHNOLOGY AND
ELECTRICAL ENGINEERING -
DEVICES AND SYSTEMS,
MATERIALS AND TECHNOLOGIES
FOR THE FUTURE**

Startseite / Index:

<http://www.db-thueringen.de/servlets/DocumentServlet?id=12391>

Impressum

Herausgeber: Der Rektor der Technischen Universität Ilmenau
Univ.-Prof. Dr. rer. nat. habil. Peter Scharff

Redaktion: Referat Marketing und Studentische
Angelegenheiten
Andrea Schneider

Fakultät für Elektrotechnik und Informationstechnik
Susanne Jakob
Dipl.-Ing. Helge Drumm

Redaktionsschluss: 07. Juli 2006

Technische Realisierung (CD-Rom-Ausgabe):
Institut für Medientechnik an der TU Ilmenau
Dipl.-Ing. Christian Weigel
Dipl.-Ing. Marco Albrecht
Dipl.-Ing. Helge Drumm

Technische Realisierung (Online-Ausgabe):
Universitätsbibliothek Ilmenau
[ilmedia](#)
Postfach 10 05 65
98684 Ilmenau

Verlag:  Verlag ISLE, Betriebsstätte des ISLE e.V.
Werner-von-Siemens-Str. 16
98693 Ilmenau

© Technische Universität Ilmenau (Thür.) 2006

Diese Publikationen und alle in ihr enthaltenen Beiträge und Abbildungen sind urheberrechtlich geschützt. Mit Ausnahme der gesetzlich zugelassenen Fälle ist eine Verwertung ohne Einwilligung der Redaktion strafbar.

ISBN (Druckausgabe): 3-938843-15-2
ISBN (CD-Rom-Ausgabe): 3-938843-16-0

Startseite / Index:
<http://www.db-thueringen.de/servlets/DocumentServlet?id=12391>

R. Krampitz; I. Horn, A. Quack, U. Werner

Jetzt das Plasma – an der Schwelle zur Kreislaufwirtschaft für die Veredelung von Kohlenstoffträger

DEVELOPMENT PROCESSES AND EQUIPMENTS

Summary: Now the plasma – at the threshold to material circulating economy for refinement of carbon carriers.

The need, carbon better to gasify in stead of to burn, it is known since the experiments of Felice Fontana (1780). Today the plasma pyrolytic conversion of hydrocarbonaceous materials is a suitable technological instrument to produce a synthetic gas by refinement of carbon carriers – with the aim: to get a base material for favourable subsequent processing into various chemical products. The plasma process gets the necessary heat of reaction from the electric arc. That has technological advantages: The produced synthetic gas isn't loaded with burning gases – above all without CO₂ and N₂, this is a typical problem of the burning technologies. Harmful substances are chemically splitted under process temperatures around 1.500 °C. The chemical conditions in the plasma atmosphere prevent novo-syntheses of environmental harmful substances. The plasma pyrolysis frequently leads in the near to technological ideal composition of 1 : 2 volume portions CO / H₂.

At the moment approximate 60 enterprises are known inside the european market of innovative products, authorized for developing plasma technological processes and as producers of plasma equipments. Up to now this particularly concerns plasma equipments for elimination of difficult disposing waste – in the beginning also the utilization of plasma-thermal effects in the metallurgy and in the development on the field of production „plasma chemistry“. The topical extent of plasma technological experiences – as well as for the assambly of plasma equipments – is considerable. The expectation is going out from chemical industry, that the plasma technology, with its advantages already in the first refinement phase „gasification of biological material or waste carrying carbon“ will become one of the main technology within the material circulating economy as soon as.

Wissenschaftliche Wurzeln – fast uralt

Holz und Torf waren die wichtigsten Kohlenstoffträger, die sich unsere Urahnen für ihre Existenzsicherung zu nutze machten. Es ging nicht anders, auch die gefundene Kohle und das Petroleum wurden verbrannt, um die Energieform „Wärme“ zu gewinnen. Und schon 1739 entfaltete *J. Clayton* wissenschaftliche Unruhe – mit seinen ersten Versuchen, aus Steinkohle den besser verwendungsfähigen Energieträger „Steinkohlen-Gas“ herzustellen. Es war für alles was sich danach an Entwicklungen der metallurgischen und chemischen Industrien anschloss bahnbrechend, als 1780 *F. Montana* die Wassergas-Reaktion $C + H_2O + 28,5 \text{ kcal} \rightarrow CO + H_2$ entdeckte. Das Ziel war, die für viele Zwecke der weiteren Verarbeitung besser geeigneten Gase Kohlenmonoxid und Wasserstoff zu gewinnen. Und das mit dem Vorteil der geringeren, technologisch ungünstigen Befrachtung der Prozessabläufe mit Nebengasen wie CO_2 und N_2 . Freilich, die Kohle musste man erst einmal auf einer Temperatur $> 900 \text{ }^\circ\text{C}$ haben, damit die Wassergas-Reaktion in Gang kommt und der Kohlenstoff bei zu niedrigen Temperaturen nicht übergewichtig zu CO_2 verbrennt.

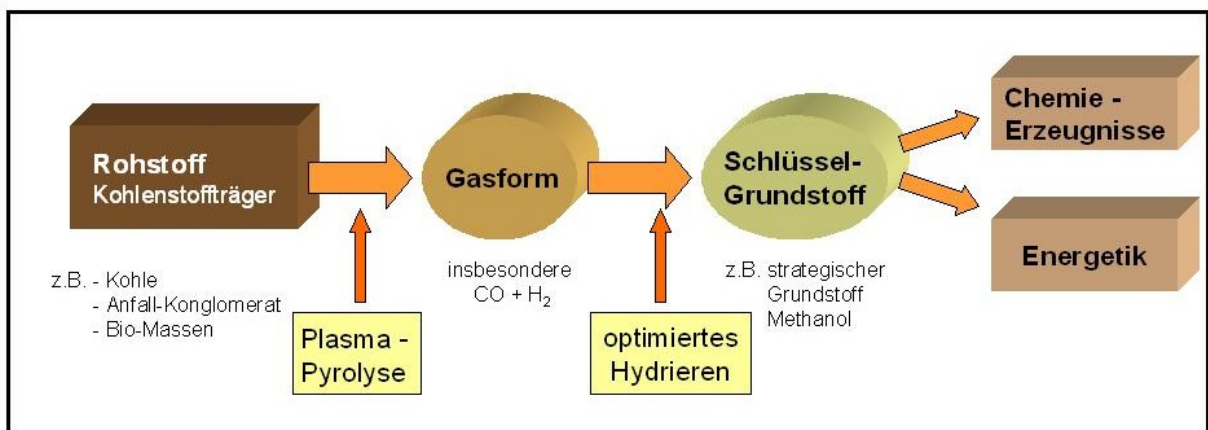


Bild 1: Technologisches „Ur-Prinzip“ mit Prozessstufe Plasma-Vergasung

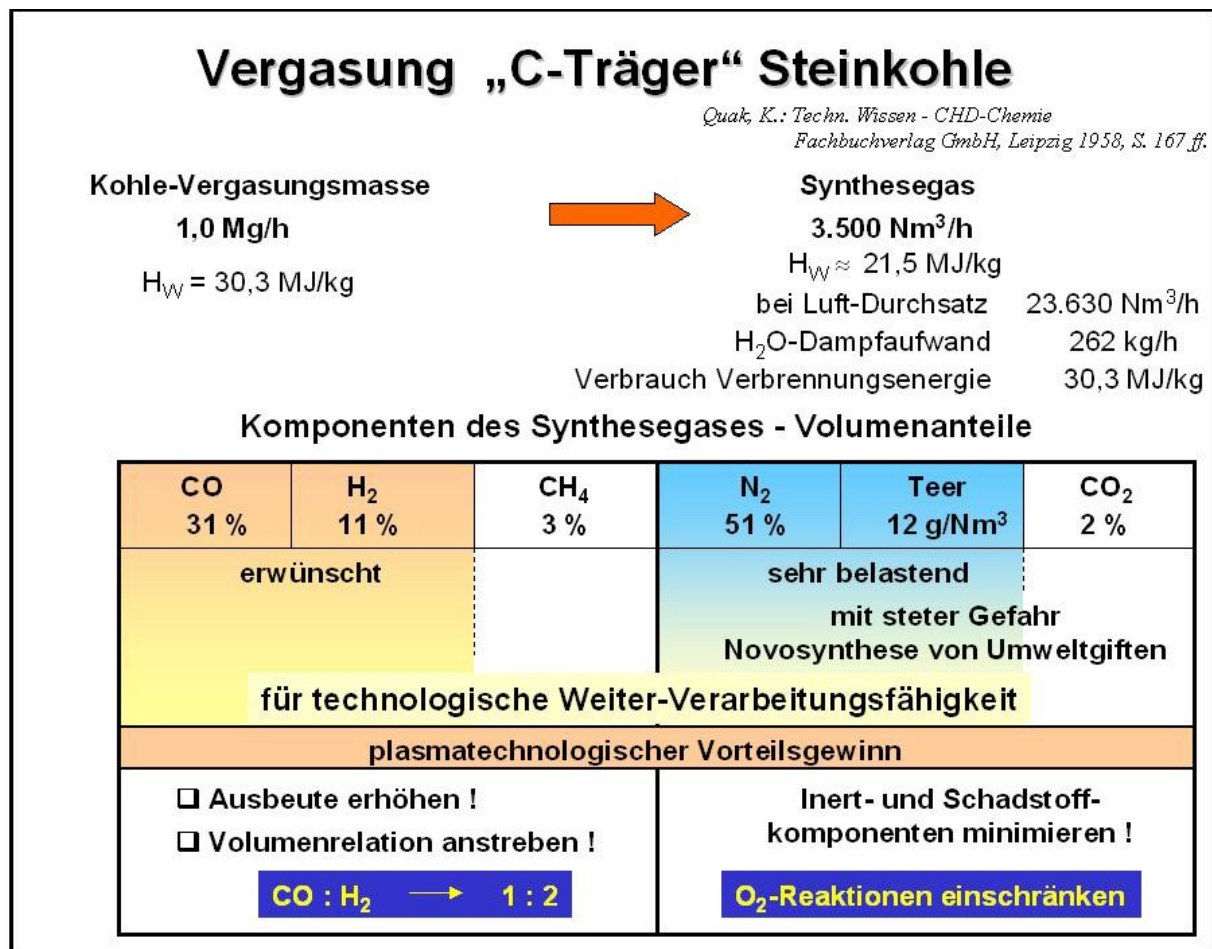
Als *Friedrich Bergius* 1913 mit seinen Forschungen zur Kohlenstoff-Gashydrierung die Tür zur modernen Chemieindustrie aufstieß, ihm wird das Verlangen nachgesagt: ... Macht mir ein Idealgas im Volumenverhältnis 1 Teil CO und 2 Teile H_2 – möglichst schon aus dem Vergasungsprozess ohne die Prozess-Ökonomie einschränkende Befrachtung mit Inertgasen. Das uns heute verfügbare Niedertemperatur-Plasma als leistungsstarkes technologisches Werkzeug hätte sein Anliegen noch weiter unterstützt, den Weg der Vergasung der Kohlenstoffträger zu beschreiten: in der Not des Mangels aus dem ersten Weltkrieg in technologischen Ketten bis zum Speisefett und heute mit der Plasma-Chemie zum strategischen Rohstoff Methanol (Methylalkohol).

Allein der Blick auf die Plasma-Technologien aus der Altfahrzeug-Entsorgung nach aktueller EU-Gesetzgebung macht unsere stoffwirtschaftliche Aufgabe deutlich. Diese verlangt spä-

testens 2015 eine Quote der Wiederverwertung von 95 % der Fahrzeugmasse – und 85 % müssen nachweisbar stofflich verwertet werden. Allein für den Raum der EU sind 2005 aus 8 Mio. Altfahrzeugen im Shredder-Leichtabfall 3,9 Mio. Mg Polymer-/Elastomerstoffe angefallen. Für 2015 wird ein Anfall dieses schwer zu entsorgenden Material-Konglomerats im Umfang von 6,5 Mio. Mg erwartet. Erste Entwicklungsergebnisse des plasma-pyrolytischen Stoff-Aufschlusses deuten darauf hin, dass sich die Plasma-Vergasung, mit dem Ziel der Herstellung hochwertiger Chemie-Produkte aus SERO- und Bio-Massen, in den nächsten Jahren zu einer Standard-Technologie der Kreislaufwirtschaft entwickelt.

Vergasungsverfahren und Plasma-Pyrolyse

Die Plasma-Pyrolyse (s. Bild 9/10) bringt einige Spezialitäten in die traditionell praktizierten Vergasungstechnologien. Bild 2 ist die Zusammenfassung eines industriellen Erfahrungsberichts der Synthesegasherstellung in der traditionellen Kombination des Heißblasens einer brennenden Kohleschicht mit Luft – und der anschließenden Herbeiführung der Wassergas-Reaktion durch das Einblasen von Wasserdampf in die überhitzte Kohleschicht.



Die Verfügbarkeit des gewünschten Synthesegases ist hier mit Nachteilen belastet:

- Belastung der technologischen Kette durch erheblichen N₂-/CO₂-Ballast,
- verlustreiche Energie-Ökonomie,
- starke Befrachtung der Prozessabläufe durch Umwelt-Schadstoffe.

Nach den heutigen Methoden der fein-analytischen Bewertung von Umwelt-Belastungen würde diese Schadstoff-Fracht die behördliche Genehmigung eines solchen Vergasungsverfahrens ausschließen bzw. die Anlagentechnik mit erheblichen Auflagen belasten. Mit neuen technologischen Handhabungen ist es dagegen möglich geworden, stofflich unklare Abfall-Konglomerate dem pyrolytischen Aufschluss zur stofflichen Wiederverwertung zuzuführen [2]. Beispielsweise die Gefahr der Bildung von Dioxinen entsteht für den Fall des Zusammenstreffens von Chlor und Sauerstoff bei jeder thermischen Abfallbehandlung. Mit der Anwendung des elektrisch erzeugten Plasmas, als Quelle für die Reaktionswärme, ist der Pyrolyse-Prozess nicht auf die Zufuhr von Verbrennungs-O₂ angewiesen. Unkontrollierten Chlor-/Sauerstoffsynthesen zu Umwelt-Giften werden in O₂-verarmter Plasma-Atmosphäre die Reaktionsbedingungen entzogen. Das Entstehen von Dioxinen und Furanen ist bis unter deren Nachweisgrenzen [3] reduzierbar.

Kohlenstoffträger		Synthese-Gas weiterverarbeitungsfähig Hydrolyse zu diversen Kohlenwasserstoffen (Bergius, 1913)		
Entgasen		Luftgas-Prozess	Vergasen	O ₂ -Druckvergasung
Ab 300 °C ⇒ CO ₂ , CO, H ₂ ; Teeriges			Wassergas-Prozess	
❶ Verschmelzung (500 - 700) °C ⇒ CO ₂ , CO, H ₂ ; Teer O + 2 H → H ₂ O ↗		❸ $C + O_2 \rightarrow CO_2$ + 410,6 kJ $CO_2 + C \rightleftharpoons 2 CO$ Heißblasvergasen 1 - 2 Minuten	❹ $C + H_2O \rightarrow CO + H_2$ - 119,4 kJ $(C + H_2O \rightarrow CO_2 + 2 H_2)$ Kaltblasvergasen 5 - 7 Minuten	❺ SVZ-/Thermoselect-Technologie
❷ Hochtemperatur-Entgasung Langkettige KW (1.000 - 1.300) °C ⇒ CO, + CH ₄ „Generator-Gas“ = CO + 2 H ₂				
Der Plasmatechnologe ... ? (nach Praxiserfahrungen)				
☺ 22,08 MJ/Nm ³	H _W	☹ (3,8 - 4,6) MJ/Nm ³	☺ (9,2 - 12,2) MJ/Nm ³	
☺ 57,9 H ₂ ; 25,8 CH ₄ ; 1,9 CO ₂	in	☹ 28 CO	☺ 52 H ₂ ; 41 CO; 2 N ₂	
☹ 5,4 N ₂	Vol.-%	☹ 50 N ₂ ; 16 CO ₂ ; 3 H ₂		
☹ 2,9 Teer nur ca. 15 → Gasform	Ma.-%	... (85 - 93) → Gasform		

Zeichen der Zeit

Die mit der günstigen Verfügbarkeit und vielseitigen Verwertung insbesondere von Erdöl und Erdgas eingeleitete technologische Epoche braucht eine weiterführende energetisch-rohstoffliche Basis. Punktuell hat man damit begonnen, technologische Konsequenzen einzuleiten aus dem Umstand [4]



... die jährlich auf der Erde in Biomasse
fixierte solare Strahlungsenergie
entspricht

ca. 50 Mrd. RÖE / a .

Zum Vergleich:

Der aktuelle Primär-Energieverbrauch
der Menschheit liegt bei

ca. 9,7 Mrd. RÖE / a .

$RÖE = \text{Rohöl-Einheit} = 1 \text{ Mg RÖ mit } 11.630 \text{ kWh}$

Dazu bietet die die Anwendung des technologischen Werkzeugs Plasma-Heizung Vorteile:

- Die Realisierung der Prozess-Wärme aus kostengünstig verfügbarer Elektro-Energie macht die Überführung der rohen Kohlenstoffträger (Pflanzenstoffe; Klärschlämme; Vergärungsrückstände; Siedlungs-, Gewerbe-, Krankenhaus-Anfallkonglomerate) frei von ökonomischen Nebenbelastungen – wie Notwendigkeiten der technologische Mitführung von Luft-Stickstoff, Inkaufnahme unerwünschter oxidativer Nebenreaktionen oder Aufwendungen für die Bereitstellung von Sauerstoff für spezielle, O_2 -gestützte Vergasungsverfahren sowie für die Reduzierung von Schadstoff-Emissionen auf mindestens die gesetzlichen Grenzwerte.
- Nicht-Erfordernis des Aufwands von O_2 als „Vergasungsmittel“, Verzicht auf Anlagen-Investitionen für die Sauerstoff-Bereitstellung,
- Die hohe Leistungsdichte von Plasma-Konvertern ermöglicht die Kompaktbauweise der technologischen Ausrüstungen. Dies begünstigt die Errichtung von plasma-pyrolytischen Aufbereitungsanlagen in dezentraler Verteilung. Diese Tendenz wird durch verfahrenstechnische Entwicklungen begünstigt, nach denen beispielsweise der chemische Schlüssel-Rohstoff *Methanol* – bisher nur ökonomisch in industriellen Großeinheiten herstellbar – wirtschaftlich auch in dezentral angesiedelten, kmu-ständisch organisierten Industriestrukturen möglich wird.

Kostengünstig verfügbare Elektroenergie, das heißt, dass die für das Betreiben des Lichtbogen-Plasmas als Wärmequelle notwendige Elektroenergie aus der Eigenherstellung des Anlagen-Betreibers – durch Abzweigung aus den produzierten Energieträgern mit erzielbaren Kosten von (3 – 4) ct/kWh – entnommen wird. Die Direktspeisung des Prozess-Plasmas über Mikro-Gasturbinen [5] steht in der Diskussion.

Pyrolytische Biomasse-Rohstoffveredelung – Beispiele

Das Lichtbogen-Kracken von Rohöl, mit dem Ziel des Aufbrechens langkettiger Schweröl-Moleküle zu kurzkettigen Benzin-Komponenten wird seit langem u. a. in den Chemischen Werken Hüls sowie in der rumänischen Erdöl-Industrie praktiziert. Die Plasma-Behandlung von SERO- und Biomassen hat andere technologische Zielpunkte.

Beispiel 1 – Plasma-Vergasung holzähnlicher Anfallstoffe:

Ein besonderer technologischer Vorzug der Plasma-Vergasung ist die große stoffliche Bandbreite zu verarbeitender Material-Konglomerate. Dies resultiert daraus, dass – ohne Ausnahme – alle in die Plasma-Reaktionssphäre eingebrachten Kohlenwasserstoff-Materialien thermisch in die hauptsächlichen Grundkomponenten CO, H₂, C (und ggf. Cl, Br, S, Hg ... aus chemischen Molekülaufbauten, Cd aus Farbstoffen) zerlegt werden. Während bei der thermischen Direkt-Verflüssigung von Holzstoffen in dem gewonnenen Öl eine größere Anzahl stofflicher Verbindungen auftritt – gewünschte und unerwünschte, bietet die Plasma-Pyrolyse in ihren Hauptkomponenten den Vorteil weitgehender Eindeutigkeit für den stofflichen Neu-Aufbau chemischer Produkte. Ergebnisse der Plasma-Pyrolyse von Holz – Bild 4 – beschreiben ungefähr das plasma-technologische Vergasungsverhalten der Stoffgruppe von trockenem Holz, Energie-/Rohstoffpflanzen bis zu Textil-/Kunststoff-Abfällen.

	Input	$\approx \rightarrow$	Prozess-Stufe			
			1		2	
			Masse %	Masse kg	Masse kg	Volumen Nm ³
Plasma- Vergasung	Trockener Holz- Abfall	C	44	0,4		
		H	6	0,06		
		O	50	0,5		
		Σ	100	≈ 1,0		
		CO			0,87	0,69
		H ₂			0,06	0,69
		C			0,07	–
				Σ	1,0	1,38
						$\frac{V_{CO}}{V_{H_2}} \approx \frac{1}{1}$
	zur Methanol- Synthese CH ₃ OH	CO			0,87	0,70
		H ₂			0,13	1,40
				Σ	1,0	$\frac{V_{CO}}{V_{H_2}} \approx \frac{1}{2}$

Beispiel 2 – Plasma-Synthese von SiC aus pflanzlichem Rohstoff [7]

Die übliche Technologie der SiC-Herstellung ist die thermische Synthese aus einem Gemenge von Quarzsand und eines Kohlenstoffträgers. SiC synthetisiert sich in einem relativ engen Temperaturfenster um (1.600 – 2.000) °C aus besonders Si-haltigem Pflanzenmaterial – wie Acker-Schachtelhalm, China-Schilf oder Reis-Spelzen – in der hochwertigen Kristall-Konfiguration β -SiC (u. a. für Ingenieur-Keramikwerkstoffe). Unter den Bedingungen einer gesteuerten Plasma-Reaktionsatmosphäre erzielt man am Beispiel dieser Stoffgruppe <Reis-Spelzen> stoffliche Umwandlungen gemäß Bild 5. Neben dem Gewinn des Ziel-Produkts β -SiC entstehen in ökonomisch interessantem Umfang die Wertkomponenten CO und H₂ für die chemische Weiterverarbeitung.

Plasma Synthese β -SiC	Input Reis-Spelzen	$\approx \Rightarrow$	Prozess-Stufe			
			1		2	
			Masse %	Masse kg	Masse kg	Volumen Nm ³
chemische Zusammensetzung (ungefähr)	$(C_6H_{10}O_5)_n + mSiO_2$		$n(6 \beta\text{-SiC} + 5 H_2 + 26 CO + 3 CO_2)$			
		C	38	0,38		
		H	5	0,05		
		O	42	0,42		
		+ Si	7	0,07		
		O	8	0,08		
		Σ	100	1,0		
		SiC			0,10	–
		CO			0,72	0,58
		H ₂			0,05	0,58
		CO ₂			0,13	0,07
				Σ	1,0	1,23

*Die SiC-Verfahrensforschung wird gefördert
durch das Bundesministerium für Wirtschaft/AiF Berlin*

Bild 5: Plasma-Synthese des Hochwert- β -SiC aus trockenen Reis-Spelzenmassen
(hier ohne Berücksichtigung der Veraschungsanteile von 3 – 5 % der Einsatzmasse)

Feuchte-Anteile oder die direkte Benutzung von Wasserdampf als Trägergas für die Ausbildung des Plasmastrahls wirken sich wenig störend auf die Prozess-Abläufe aus. Die vermehrte Wasserstoff-Bildung erfordert dann jedoch den zusätzlichen Energieaufwand von ca. 5,8 kWh/kg Wassereintrag. In Abhängigkeit von der stöchiometrischen Relation der vorliegenden Kohlenstoff-Menge kann mit dem Wassereintrag das jeweilige Reaktions-Gleichgewicht auf die Verminderung der Ruß-Entstehung – bei höherer Gasausbeute – verlagert

werden. Technologische Abwägung ist geboten, weil die Biomassen (anders als Kohle) von sich aus bereits relativ viel Sauerstoff in den Reaktions-Prozess einführen. Der höhere Sauerstoff-Eintrag mit dem Wasser kann dann zu unerwünscht vermehrter CO_2 -Bildung führen.

Plasma-technologische Anlagentechnik

Der heutige Stand der Anlagentechnik – mit etwa 60 im Plasma-Anlagenmarkt autorisierten Anbietern – hat sich seit den 60er Jahren nach jeweils zeitgemäßen Erfordernissen in Entwicklungsperioden vollzogen:

1960 - 1990 Plasma-Schmelztechnologie für Metalle und Glas.

Errichtung eines 6 MW-Plasma-Schmelzofens durch Wissenschaftler und Techniker des Instituts *M. v. Ardenne* Dresden, der *TH Ilmenau* und von Technikern des Betriebsbereichs *Elektrowärme* der *Lokomotivbau- u. Elektrotechnischen Werke* Hennigsdorf im Edelstahlwerk Freital (D). Norwegische Metallurgieunternehmen haben damit begonnen, die Wind-Einblasttechnik an Hochöfen durch den Heizenergie-Eintrag mittels Plasmatrons für die Herstellung von Qualitätsstahl zu ersetzen.

1980 - 2000 Aus Anforderungen des Umweltschutzes Entwicklung von Plasma-Verfahren und -Anlagen zur Entsorgung von mit Schadstoffen belasteten Abfällen – anlagentechnische Entwicklungen siehe Bilder 6, 7, 8.

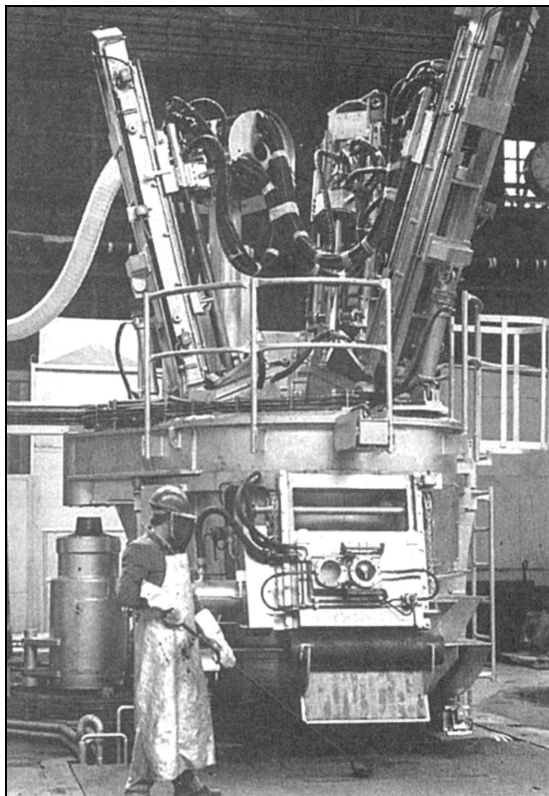


Bild 6: Versuchsreaktor zur Verglasung toxischer Filterstäube zu inerten Schlacken, die bei Langzeitablagerung keine Eluate mehr bilden und damit als Zuschlagsstoffe im Bauwesen und im Bergwerks-Versatz verwendet werden können [8].

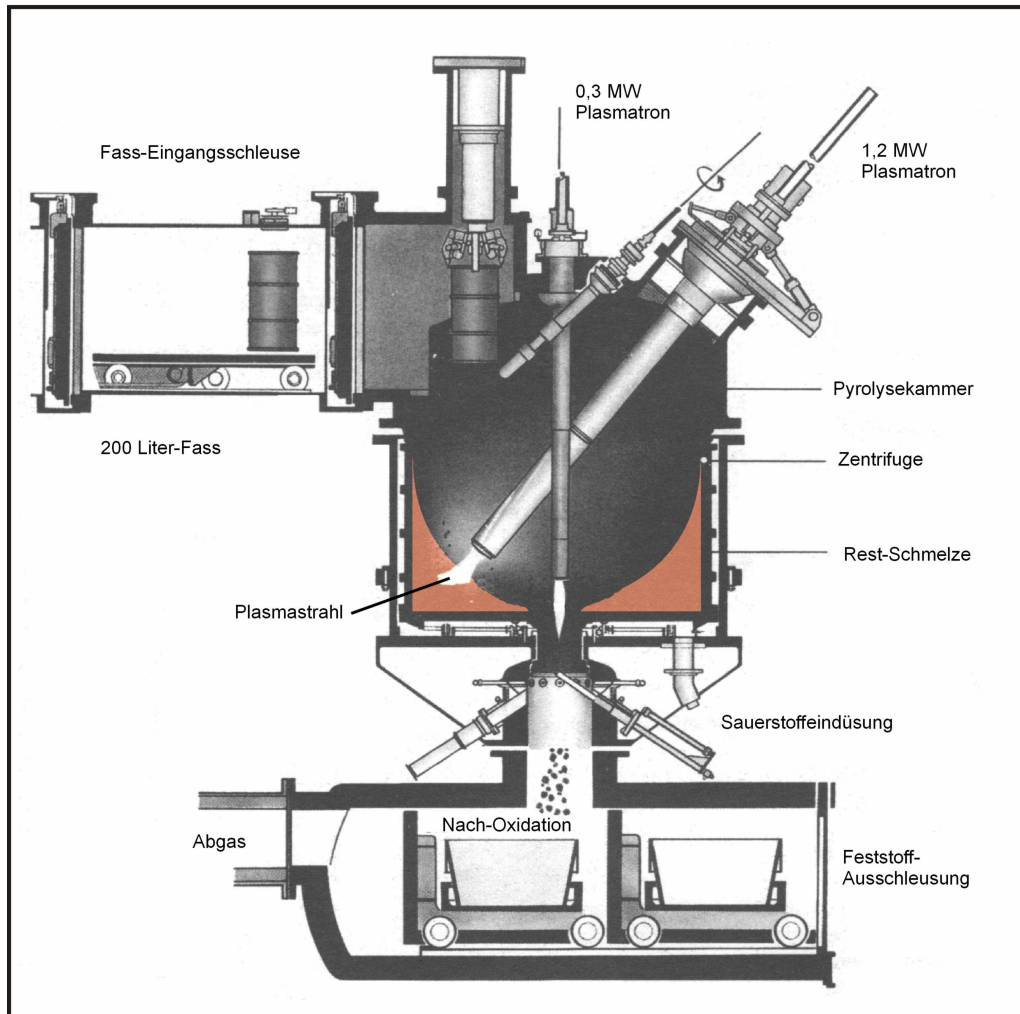


Bild 7: PLASMOX-Technologie – Verfahrenschema der Inertisierung toxisch stark kontaminierter Chemie-Abfälle.
 Werkmitteilung der Moser & Glaser Co., MuttENZ (CH).

Das 2Stufen-Prinzip der PLASMOX-Technologie, des als Zentrifuge ausgebildeten Primär-Reaktionsgefäßes mit nachgeschalteter Nachbrennkammer ist eine Entwicklung der US-amerikanischen RETECH, Inc. „Plasma Arc-Vitrification“ [9]. Die im Bild 7 dargestellte Vitrifikations-/Vergasungsanlage ist eine geschlossene Einheit. Genau danach ist der sogenannte „Plasma-Ofen“ für die Beseitigung chemischer Kampfstoffe im Militärbereich Munster-Nord (D) von Schweizer Firmen – mit einem extrem hohen Sicherheitsstatus im Aufwand von insgesamt 135 Mio. € – entwickelt und errichtet worden [10]. Die Verarbeitungskapazität dieser Plasma-Anlage beträgt 17 Mg/d.

1995 - 2010 Beginn der Ausschöpfung von Vorteilen der plasma-pyrolytischen Vergasung von Kohlenstoffträgern. Zunächst erstreckten sich die technologischen Entwicklungen auf die Rück-Umwandlung von Kohlenwasserstoffabfällen (Kunststoffabfälle, Alt-Öle, Farbstoffe, teerige Substanzen ... PCB-belasteter Elektromüll) auf ihre chemischen Grund-Bausteine Kohlenmonoxid und Wasserstoff – mit dem

Vorzug, dass in der Plasma-Reaktionsatmosphäre gleichzeitig auch vorhandene Umweltgifte abgebaut werden oder ihre Novo-Synthese verhindert wird.

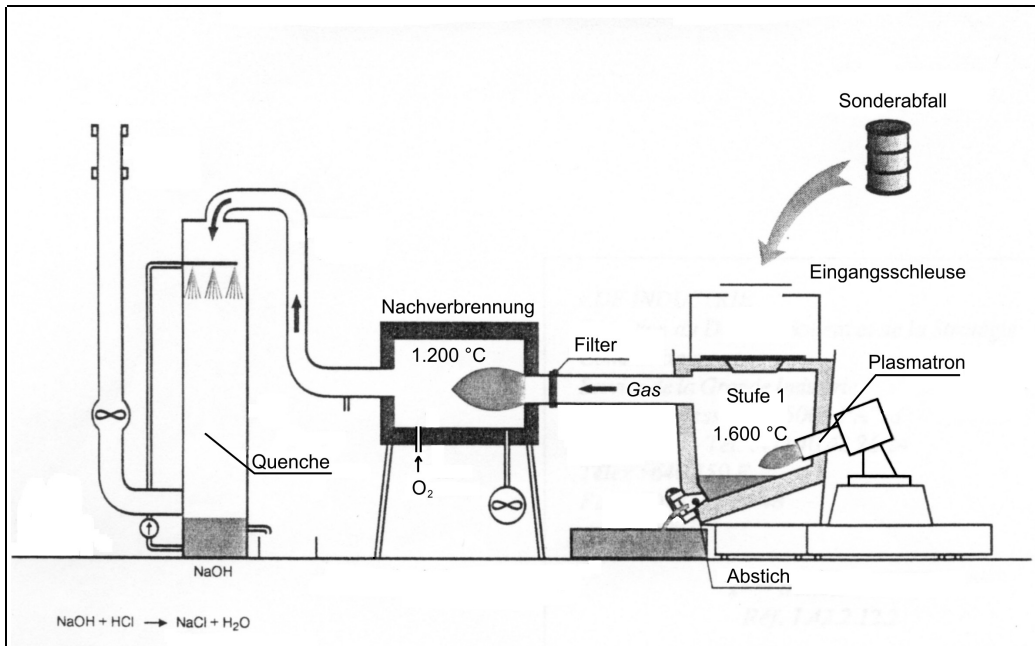


Bild 8: 2stufige Plasma-Pyrolyse-/Vitrifikationsanlage in Porcheville (F). Pilotanlage zur vorrangigen Volumenreduzierung toxisch und radioaktiv belasteter Abfälle – EDF Industrie, Service de la Grande Industrie, Paris.

- rechts – Plasmatron (800 kW) mit Versorgungseinrichtungen,
- rechts – Einschmelz-/ Vergasungskammer, unten Schlackeausslass, ... 600 kg/h, (Prozessstufe 1: 1.550 °C, Volumen-Reduktion $\frac{1}{17}$... $\frac{1}{20}$),
- mitte – Nachbrenn-/Oxidationskammer unter O₂-Einführung (Prozessstufe 2: 1,6 s bei 1.200 °C,
- links – Neutralisierung des Pyrolysegases zu dessen chemischer Weiterverarbeitung.

Gegenwärtig beginnen Biomassen – mit ihren rohstofflichen Eigenarten – verfahrenstechnisch strukturierend auf die Entwicklung technologischer Ketten der Plasma-Chemie zu wirken. Die Hinwendung auf die plasma-technologische Verarbeitung, in Konkurrenz zu meist großtonnagigen traditionellen luft- oder sauerstoff-pyrolytischen Vergasungsverfahren, geht insbesondere von mittelständischen Rohstoff-Veredlern aus. Die aktuelle Marktrelevanz liegt bei Anlagengrößen mit Verarbeitungsleistungen von maximal etwa 25 TMg/a. Bild 8 zeigt den Prototyp eines Plasma-Pyrolysekonverters wie er für die Vergasung flüssiger Kohlenwasserstoffträger entwickelt worden ist und derzeit für die Entwicklung von Technologien zur stofflichen Veredelung von Bio-Massen benutzt wird [6].



Bild 9: Plasma-Pyrolysekonverter

PYROPLAS 500[®];
 Plasma-Leistung: $P_P = \dots 300 \text{ kW}$,
 Plasma-Arbeitsspannung zweistufig:
 $U_P = \dots 400/\dots 1.500 \text{ V}$;
 Rohstoff-Verarbeitungsleistung:
 $m' = \dots 500 \text{ kg/h}$.

(Werkbild ENA GmbH, Abbildung ohne
 Magnetisierungs-Wicklung)

Die Plasma-Vergasung erfüllt hohe Ansprüche an die erzielbare Qualität des Pyrolysegases in ihrer stofflichen Eindeutigkeit der Reaktionsprodukte. Insbesondere zum sicheren Abbau von Rest-Schadstoffen wird gewünscht, das entstehende Pyrolysegas einer thermischen Nach-Konditionierung zu unterziehen. Nach dem konstruktiven Prinzip – Bild 10 – geschieht dies im PYROPLAS-Konverter dadurch, dass das entstandene Gas durch den Hitzekegel eines rotierenden Plasma-Bogens geleitet wird.

Die Besonderheit dieser Konstruktion besteht in der Anordnung des Plasma-Elektroden-systems. Die Katode ist als Lochkreisscheibe ausgeführt. Der katodische Ansatz des Plasmabogens an der Innenkante der Scheibenbohrung bewirkt die Entstehung einer I_{Px} -Komponente des Plasmastroms I_P . Diese Stromkomponente bewirkt für jedes Längenelement $d\vec{l}$ des Plasmabogens in dem durch die Magnetisierungs-Wicklung (7) erzeugten Magnetfeld \vec{B} gemäß $d\vec{F} = I_{Px} (d\vec{l} \times \vec{B})$ eine Rotationsbewegung des Plasmabogens auf der Lochkreisscheibe und bildet somit – in seiner Doppelfunktion zur plasmathermischen Gasbildung am Pyrolysegut auf der Verteilerplatte 4 – den Hitzekegel 3 für die gewünschte Nachkonditionierung des entstandenen Synthesegases aus.

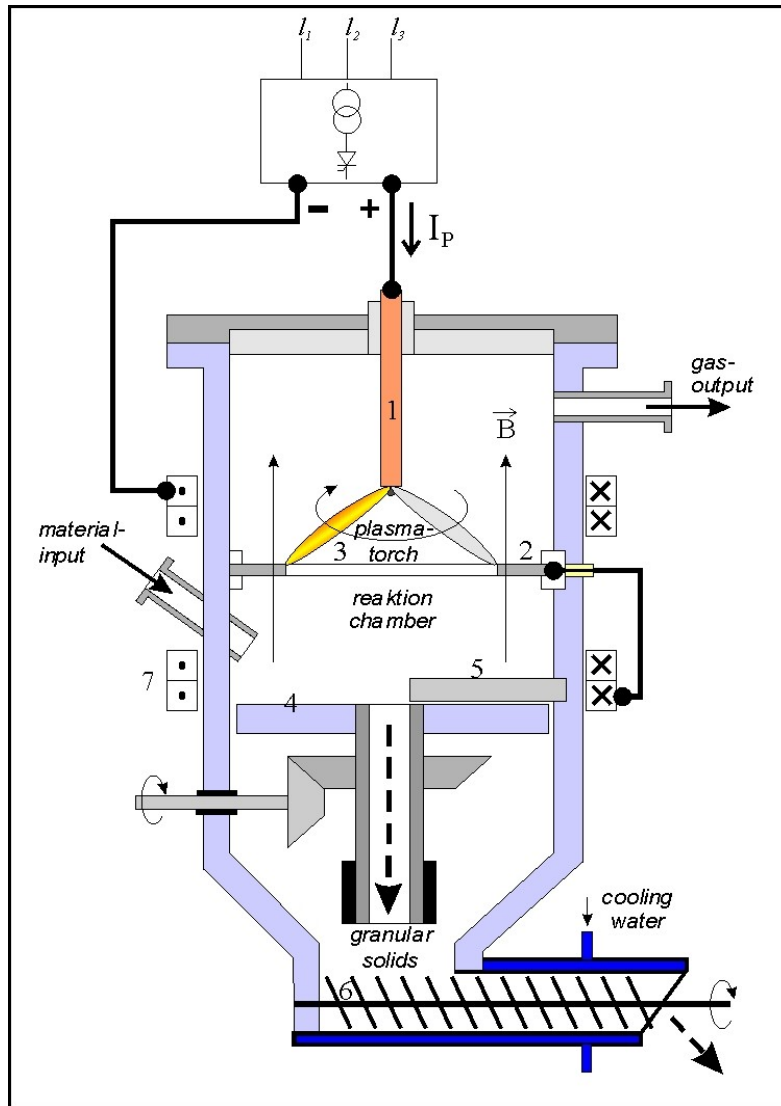


Bild 10: Plasma-Konverter mit rotierendem Plasma-Bogen für die Vergasung von organischen Kohlenstoffträgern (Konstruktionsschema).

- 1 Plasmatron – mit Schutzgas- und ggf. Kühlwasser-Zuführung
- 2 Ringelektrode aus Graphit
- 3 Plasma-Hitzekegel
- 4 Verteilerplatte mit Abstreifer 5
- 6 Feststoff-Austragsschleuse
- 7 Magnetisierungswicklung

Gastechnologischer Effekt der Plasma-Pyrolyse

Die Auswahl von Material-Pyrolysen nach Bild 11 vermittelt eine Übersicht zu gastechnologisch erzielbaren Ergebnissen, wie sie die Extrapolation auf die große Materialgruppe vergasungsgerechter Kohlenstoffträger zulässt. Hervorzuheben ist der gastechnologische Rohstoffwert der Einsatzmaterialien hinsichtlich der entstehenden Wertkomponenten CO und H₂ – wie sie mit nur geringen Nebenstoff-Befrachtungen in Größenordnungen der optimalen chemischen Weiterverarbeitung anfallen. Gewöhnlich ist dann noch ein Verschneiden des Synthesegases mit zusätzlichem Wasserstoff erforderlich. In der technologischen Kopplung

mit der plasma-technologischen Altreifen-Pyrolyse kann dieses, eigentlich für die Rückgewinnung hochwertiger Kohlenstoff-Konfigurationen geeignete Verfahren in die Rolle des Wasserstoffspenders treten.

Stoffkomponente im Plasmapyrolytischen Synthesegas (Stoff-Anteilswerte $\pm 10\%$)	Einsatzmaterial der plasmathermischen Behandlung					
	Bahnschwellenholz	Alt-Teerablagerungen ¹	Klärschlamm 83 % TM ²	Altreifen ohne Metallanteil	PCB-haltiges Trafo-Öl ³	Elektrschrott ⁴
Übergang der Einsatzmassen in die Gasform	77 %	50 % ⁵	65 %	94 %	83 %	nach Gemengeart
	Ergänzungs-Masseanteile zu 100 % finden sich im Prozess-Ruß und –Koks, Ruß-/Koks-Masseverhältnis $\varnothing \approx 1 : 0,5 \dots 1 : 2$					
Pyrolysegas-Heizwert H_U in MJ/Nm ³	12,0	11,3	11,5	10,9	11,0	10,8
Gas-Anteile	In Vol.-%					
O ₂	... 2,0	... 3,0	... 4,0	... 0,2	... 0,1	... 1,2
H ₂	... 52,0	... 74,0	... 51,0	... 84,0	... 94,0	43 ... 70
CO	... 40,0	... 30,0	... 43,0	$\approx 4,0$	$\approx 4,9$... 33,0
N ₂	... 5,0	$\approx 0,6$... 6,0	... 2,0	$\approx 0,4$	$\approx 0,6$
CO ₂	$\approx 0,1$	$\approx 0,4$	$\approx 0,5$	$\approx 0,03$	< 0,02	< 0,02
CH ₄	$\approx 0,3$	$\approx 0,3$	0,06	0,5	0,5	0,2
H ₂ S, CS ₂	$\approx 0,1$	< 0,02	< 0,02	< 0,1	$\approx 0,03$	< 0,02
NO _x in ppm ⁶	... 25	... 75	... 85	... 42	... 25	... 25
3 – 6 % Restgasanteile: Wasserdampf, HCN, Ar, He, HCl, HF, Metaldämpfe						

¹ Teer-Ablagerungsmassen der Gaserei Magdeburg-Rothensee
² Klärschlamm (nachgetrocknet) der Kläranlage Magdeburg-Gerwisch
³ aus Austauschprogramm „PCB-haltige Isolier- und Wärmeträger-Öle aus Energieeinrichtungen“
⁴ Elektronikschrott mit PCB-haltigen Bauelementen – mit insgesamt 2,216 mg PCB/kg
⁵ hoher Anteil von Feststoff-Rückständen, plasma-technologisch bleibt der in der teerigen Substanz chemisch ungebundene Kohlenstoff enthalten
⁶ nach TA-Luft zulässiger Grenzwert 373 ppm

Bild 11: Plasma-thermischer Vergasungseffekt ausgewählter Einsatzmaterialien [6].
(Analysedurchführung: *AllChem GmbH, Magdeburg*. Akkreditierter Sachverständiger für Lebensmittel- u. Umweltanalytik)

Bereits geringe Halogen-Masseanteile können im Zusammentreffen mit Sauerstoff in pyrolytischen Prozessen zur Bildung gefährlicher Umweltgifte, wie z.B. polyzyklische Aromate oder Dioxine, führen. Letztere (mit ihrer im Vergleich zum Zyankali 10.000fachen toxischen Wirkung auf Mensch und Tier) traten im Pyrolysegas und in dem Ausgangsfeststoffkonglomerat nur in Spuren unterhalb der Nachweisgrenzen auf.

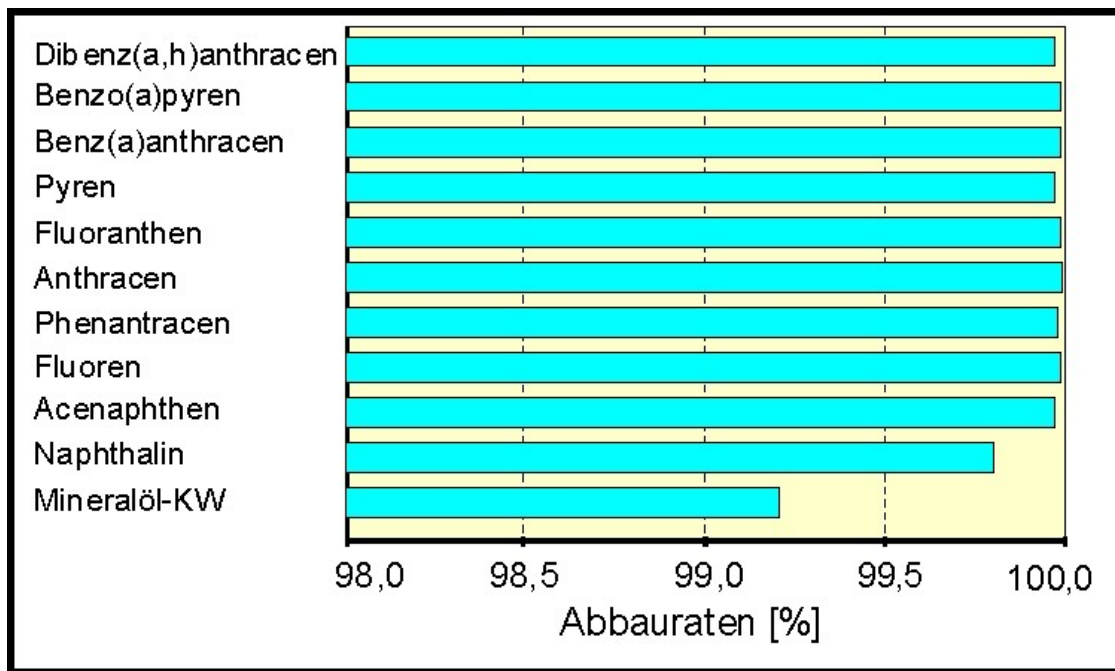


Bild 12: Analyse des Synthesegases aus der Plasma-Pyrolyse von kontaminierten Altholz-Eisenbahnschwellen – Abbauraten wesentlicher Kohlenwasserstoff-Schadstoffe bei einer Eingangsbelastung von 16,4 kg Holzschutz-Tränkmitteln je Mg Alt-Holz.
(Analysedurchführung: Herzsuh, R.; Köhler D. Inst f. Analytische Chemie der Universität Leipzig.)

Die Plasma-Reaktionsatmosphäre ist so einstellbar, dass Sauerstoff nur weit unterstöchiometrisch prozessbeteiligt ist. Dadurch sind Schadstoffen bei hohen Abbauraten – Bild 12 – die Bildungsbedingungen entzogen. Es ist bekannt, dass sonst die Beherrschung der Schadstoff-Emissionen bei thermischen Behandlungstechnologien die anlagentechnischen Aufwendungen nach dem Verlangen der Bundes-Immissionschutzverordnungen bis zu 55 % der Anlageninvestition erfordern kann.

Quellenverzeichnis

- [1] Quak, K.: Reihe Technisches Wissen, Bd. CHO-Chemie, S. 167 ff. Fachbuchverlag GmbH Leipzig 1958.
- [2] Thomé-Kozmiensky, K. J.: Pyrolyse von Abfällen, S. 43 ff. EF-Verlag für Energie und Umwelttechnik GmbH, Berlin 1985.
- [3] Herzsuh, R. Köhler, D.: Analytische Untersuchungen der Abfallpyrolyse mit der Plasma-Vergasungsanlage PYROPLAS 500 der ENA GmbH. DA Inst. f. Analytische Chemie der Universität Leipzig, 11/1994.
- [4] Prognosstudie 2004: Das Potenzial der Biomasse.
- [5] Krautkremer, B. (ISET Inst. f. solare Energieversorgungstechnik, Hanau): Mikro-Gasturbine im Konzept der Biogasverwertung. Vortrag 18. Kasseler Abfallforum „Bio- u. SERO-Verwertung“ 04/2006.
- [6] Horn, I.; Krampitz, R.; Quack, A.; Werner, U.: Plasma-Pyrolyse – auf dem Weg zur Standardtechnologie der Recyclingwirtschaft. RECYCLINGmagazin (61)2006, Ausgabe 07, S. 22 – 25.
- [7] Nöske, R.; Horn, I.: Verfahren zur Herstellung von Siliciumcarbid aus nachwachsenden Rohstoffen. Pat. Int. Cl. C 01 B31/36. DE 100 20 626 A1 (08. 11. 2001).

- [8] Thyssen Krupp AG, Düsseldorf – in Mitteilungen des Bundesministeriums f. Bildung u. Forschung, Berlin: „Plasmatechnik – Prozessvielfalt + Nachhaltigkeit“. BMBF PUBLIK 2000, S.31.
- [9] SITE - US-amerikanisches Demonstrationsprogramm „Neue Umwelttechnologien“ für das Jahr 1992, p. 138/139.
- [10] <http://www.wirtschaftsbild.de> (Ausgabe Februar 2006). <http://www.geka-munster.de> (Betreiberinformation – Plasma-Anlage zur Entsorgung von Extrem-Schadstoffen).